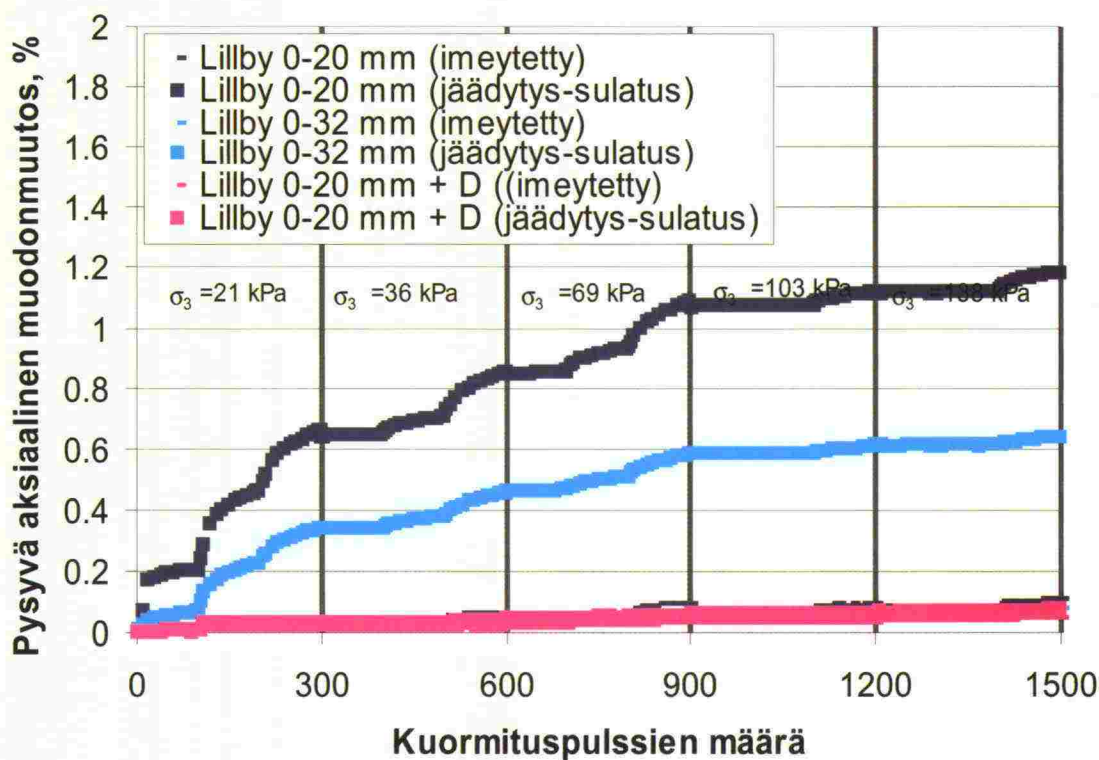


Nuutti Vuorimies, Pauli Kolisoja, Timo Saarenketo ja Hannu Peltoniemi

Väylämateriaalien vuodenaikaiskäyttäytymisen tutkimukset 2001-2003

Tiehallinnon selvityksiä 4/2004



Nuutti Vuorimies, Pauli Kolisoja, Timo Saarenketo ja Hannu Peltoniemi

Väylämateriaalien vuodenaikaiskäyttämisen tutkimukset 2001-2003

Tiehallinnon selvityksiä 4/2004

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-191-6
TIEH 3200852

Verkkoversio (www.tiehallinto.fi/julkaisut) pdf
ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-192-4
TIEH 3200852-v

Edita Prima Oy
Helsinki 2004

Julkaisua myy:
asiakaspalvelu.prima@edita.fi
puh. 020 450 011
fax. 020 450 2470



TIEHALLINTO
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 11

Nuutti Vuorimies, Pauli Kolisoja, Timo Saarenketo ja Hannu Peltoniemi:
Väylämateriaalien vuodenaikaiskäyttämisen tutkimukset 2001-2003. Helsinki 2004.
Tiehallinto, Tiehallinnon selvityksiä 4/2004. 32 s.+ 1 liite. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-191-6, TIEH 3200852.

Asiasanat: Geofysikaaliset menetelmät, dielektrisyys, kosteuspitoisuus, muodonmuutokset, kiviainekset, tierakenne, routanousu, sulamispehmeneminen, vuodenaikat, vedenkestävyys

Aiheluokka: 32, 56

TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus jatkaa tierakenteessa tapahtuvien dielektrisyysarvojen muutosten ja rakenteen kuormituskestävyyden välistä riippuvuutta koskevan tiedon hankintaa. Tutkimukseen on sisällynyt sekä Tampereen teknillisen yliopiston Pohja- ja maarakenteiden laboratorion hankkimalla Percoasemalla tehtyjä mittauksia että materiaalien vedenherkkyysominaisuuksia mittaavia laboratoriokeita. Percoasema on reaaliaikainen tierakenteiden kosteus- ja kantavuustilaa seuraava mittausjärjestelmä, jolla voidaan mitata kerrosten dielektrisyyttä, sähkönjohtokykyä sekä lämpötilaa. Dielektrisyys kuvaa materiaalin huokostilassa olevan vapaan veden määrää ja siten sen alttiutta dynaamisista kuormituksista johtuvalle huokosvedenpaineen kohoamiselle ja lopulta tierakenteen pysyville muodonmuutoksille

VTT:n kevytpäällysteisten teiden tutkimusohjelman koetiekonekuormitusten yhteydessä Percoasemalla mitattiin luiskaamattomasta ja luiskatusta koerakenteesta dielektrisyyden ja sähkönjohtavuuden muutoksia. Erityisesti koerakenteiden sorakerroksista mitattujen sähkönjohtavuuksien käyttäytyminen erosi toisistaan. Luiskaamattomassa koerakenteessa sähkönjohtavuudet pysyivät kuormitusten aikana samalla tasolla, kun taas luiskatussa koerakenteessa sähkönjohtavuudet nousivat 40 ja 50 kN pyöräkuormalla tehtyjen kuormitusten yhteydessä. Sähkönjohtavuuden nousu johtunee leikkausmuodonmuutosten aiheuttaman maapartikkelien välisen hankauksen vaikutuksesta maapartikkelien pinnoilta irtautuvien kolloidien määrän lisääntymisestä huokosvedessä.

Percoaseman vapauduttua kevytpäällysteisten teiden koekuormituksista se sijoitettiin marraskuussa 2001 Tampereen lounaispuolelle Säijään. Säijässä mitattiin peltoaukealla sijaitsevan matalapenkereisen vähäliikenteisen päällystetyn tien käyttäytymistä elokuuhun 2002 asti. Paikan valintaan vaikutti ensisijaisesti tarve saada Percoasemalla mittaustuloksia erilaisesta tierakenteesta verrattuna ensimmäisen Percoaseman sijoituspaikkaan Rovaniemen Koskenkylässä. Tiellä tehdyissä mittauksissa havaittiin tierakenteen ongelmien liittyvän lähinnä pohjamaan heikkoon kantavuuteen sekä erityisesti pohjamaassa ja vanhan tierakenteen alaosassa tapahtuviin routanousuihin. Vähäisen ja pääosin kevyen moottoriliikenteen ansiosta tie ei ole kuitenkaan vaurioitunut tien keskilinjalla esiintyvää pitkittäishalkeamaa lukuun ottamatta.

Lillbyn ja Emetin ongelmallisilla kalliomurskeilla tutkittiin hieno-ainespitoisuuden ja muutamien vedenherkkyteen vaikuttavien käsittelyaineiden vaikutusta niiden vedenimukykyyn Tube Suction -kokeilla. Vuodenaikaisvaihtelua simuloivalla syklisellä kolmiaksaalikoemenetelmällä tutkittiin lisäksi lupaavimman käsittelyaineen vaikutusta Lillbyn kalliomurskeen mekaanisiin ominaisuuksiin. Parhaimmillaan jonkin käsittelyaineen vaikutus ongelmalliseen kalliomurskeeseen voi olla erinomainen kun taas toisella käsittelyaineella ei näyttäisi juurikaan olevan parantavaa vaikutusta.

Nuutti VUORIMIES, Pauli KOLISOJA, Timo SAARENKETO ja Hannu PELTONIEMI.
Väylämateriaalien vuodenaikaiskäyttötymisen tutkimukset 2001-2003. [Studies of Seasonal Behaviour of Road materials in 2001-2003]. Helsinki 2004. Finnish Road Administration. Finnra Reports 4/2004. 32 p. + app. 1 p. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-191-6, TIEH 3200852.

Index terms: Dielectricity, moisture content, deformation, aggregates, road structure, frost heave, thaw weakening, seasonal variation, susceptibility to water

ABSTRACT

This research has continued accumulating knowledge on the interdependency between changes of dielectric value in a road structure and bearing capacity of the structure. The research has involved moisture susceptibility measurements of pavement materials done in the laboratory and also in-situ with the Percostation purchased by the Laboratory of Foundation and Earth Structures at the Tampere University of Technology. The Percostation is a real-time monitoring system, which utilises dielectricity, electrical conductivity and temperature measurements in the monitoring of the moisture content and bearing capacity of a road structure. Generally speaking the dielectric value represents the volume of free water contained in the material, which correlates to the propensity for the development of excess pore water pressure in the material when it is exposed to a dynamic load, which in turn relates to the potential for the development of permanent deformations of the road structure.

The Percostation has been used to measure changes of the dielectric value and electrical conductivity in test structures with and without slope loaded using a Heavy Vehicle Simulator (HVS) in connection with a research project on low-volume roads at VTT (Technical Research Centre of Finland). During the HVS loading especially the behaviour of electrical conductivity in the gravel sub-base layer was different between the two test structures. In the test structure without slope electrical conductivity stayed at a constant level during the loading while in the test structure with a slope electrical conductivity values increased during the loading with 40 and 50 kN wheel loads. Most likely the increase of electrical conductivity arised from the chafing of soil particles against each other due to shear deformations and thus the increasing amount of colloids breaking away from the surfaces of soil particles into the pore water.

After the Percostation was released from the low-volume road HVS tests it was placed at Säijä, South-West from Tampere, in November 2001. Behaviour of a low traffic paved road with a low embankment on a field area at Säijä was monitored until October 2002. The principal reason in choosing the new location for the Percostation was the need to obtain measurements from a different type of site so as to enable comparisons with the results obtained from the Percostation at Koskenkylä, Rovaniemi. The problems with the road structure at Säijä were related mostly to the poor bearing capacity of subsoil and especially to the frost heave taking place in the subsoil and the lowest part of the old road structure. The road had, however, not been damaged, apart from a longitudinal crack in the middle of the road, because of low volume and mainly the light weight of the traffic.

Tube Suction tests were used to study the effect of fines content and some treatment agents on the water susceptibility of problematic crushed rock aggregates of Lillby and Emet. In addition, a cyclic loading triaxial test procedure simulating the effect of seasonal variation was used to study the effect of the most promising treatment agent on the mechanical behaviour of the crushed rock from Lillby. At best the effect of some treatment agents on

a problematic crushed rock aggregate can be excellent while some other treatment agents seem to have no improving effect at all.

ESIPUHE

Tampereen teknillisen yliopiston Pohja- ja maarakenteiden laboratorio aloitti Vaasan ja Lapin tiepiirien sekä Roadscanners Oy:n kanssa 1990-luvun puolivälissä sarjan erillisiä tutkimusprojekteja, joissa tarkoituksena on ollut tutkia sitomattomien ja sidottujen kantavan kerroksen murskeiden vuodenaikaiskäyttämiseen vaikuttavia mekaanisia, sähköisiä ja termodynaamisia tekijöitä. Tutkimusta oli tarkoitus jatkaa vuosina 2001-2002 laajalla yhtenäisellä tutkimuksella, jota jouduttiin kuitenkin sekä sisällöllisesti karsimaan että aikataulullisesti venyttämään tutkimusohjelman rahoituksen jäätyä merkittävästi alunperin aiottua pienemmäksi.

Tämän tutkimuksen toteutus ei olisi ollut mahdollista ilman Tiehallinnon, Tieliikelaitoksen ja Roadscanners Oy:n tukea ja rahoitusta. Lisäksi haluamme kiittää Hämeen tiepiiristä Heikki Koskea, Matti Kylmäkoskea ja Pentti Karhua saamastamme avusta Percoaseman sijoittamisessa Säijään sekä mittausavusta kohteella. VTT:n Pekka Halosta kiitämme lisäksi hyvin hoidetuista mittauksista kevytpäällysteisten teiden koerakenteista.

Tämän tiivistetyn yhteenvedon kirjoittamisesta ovat pääosin vastanneet Nuutti Vuorimies ja Pauli Kolisoja Tampereen teknillisen yliopiston Pohja- ja maarakenteiden laboratoriosta yhteistyössä Roadscanners Oy:n Timo Saarenkedon ja Tieliikelaitoksen Hannu Peltoniemen kanssa. Lisäksi Aarno Valkeisenmäki on osallistunut projektin johtoryhmän työskentelyyn antaen arvokkaita kommentteja.

Tampereella marraskuussa 2003

Tekijät

Tiehallinto

Sisältö

1	JOHDANTO	11
2	PERCOASEMAMITTAUKSET KEVYTPÄÄLLYSTEISTEN TEIDEN KOERAKENTEISTA OTANIEMESSÄ 2001	12
3	PERCOASEMAMITTAUKSET SÄIJÄSSÄ	21
4	LILLBYN JA EMETIN KALLIOMURSKEIDEN KOESARJA	26
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	32
6	VIITTEET	34

1 JOHDANTO

Tien sitomattomien rakennekerrosmateriaalien dielektrisyysarvon ja materiaalin kuormituskestävyyden sekä muun mekaanisen käyttämisen välistä riippuvuutta on tutkittu Suomessa pian vuosikymmenen ajan. Timo Saarenkedon aloittamista tutkimushankkeissa (Saarenketo and Scullion 1995 ja Saarenketo et al. 2000 ja 2001) on kertynyt laajalti tutkimusaineistoa materiaalien Tube Suction -kokeissa mitatuista dielektrisyysarvoista sekä materiaalien yleisestä käyttäytymisestä tien rakennusmateriaaleina. Viime vuosina on myös pyritty mittaamaan minkälaisia muutoksia materiaalin dielektrisyydessä tapahtuu liikenteen ja ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta säännöllisin väliajoin tehtävissä pitkäaikaisissa mittauksissa sekä yksittäisen raskaan ajoneuvon ylityksen aikana lyhyt aikaisena jatkuvana mittauksena erityisesti keväällä tien ollessa heikoimmillaan roudan sulamispehmenemisen aikana (Saarenketo 2001 ja Vuorimies et al. 2002).

Tämä tutkimusprojektin tarkoituksena oli jatkaa aiempia tutkimuksia lisäten tietoutta kuormitusten ja olosuhteiden vaikutuksesta sekä Percoasemalla tehtävissä mittauksissa että väylämateriaalien laboratoriotutkimuksissa. Tutkimusprojekti jakautui kolmeen selkeästi erilliseen osaan, joita yhdisti väylämateriaaleista mitattavina suureina dielektrisyys ja sähkönjohtavuus. Ensimmäisessä osassa mitattiin Percoasemalla dielektrisyyden ja sähkönjohtavuuden muutoksia kahdesta kevytpäällysteisten teiden koerakenteesta, joita kuormitettiin koetiekoneella (HVS). Toisessa osassa Percoasemalla mitattiin lähes vuoden ajan vähäliikenteisen päällystetyn tien ominaisuuksien muutoksia. Viimeisessä osassa tutkittiin hienoaineksen määrän sekä erilaisten käsittelyaineiden vaikutusta kahden erilaisen kalliomurskeen ominaisuuksiin pääosin Tube Suction -kokeilla.

Tämä selvitys tiivistää kuvapainotteisesti tutkimusprojektin keskeisiä tuloksia ja havaintoja, jotka on esitelty yksityiskohtaisemmin TTY:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion julkaisusarjassa. Lisäksi liitteessä 1 on erittäin lyhyesti selitetty keskeiset termit dielektrisyys, sähkönjohtavuus, Tube Suction -koe ja Percoasema helpottamaan tämän tiivistetyn raportin lukemista.

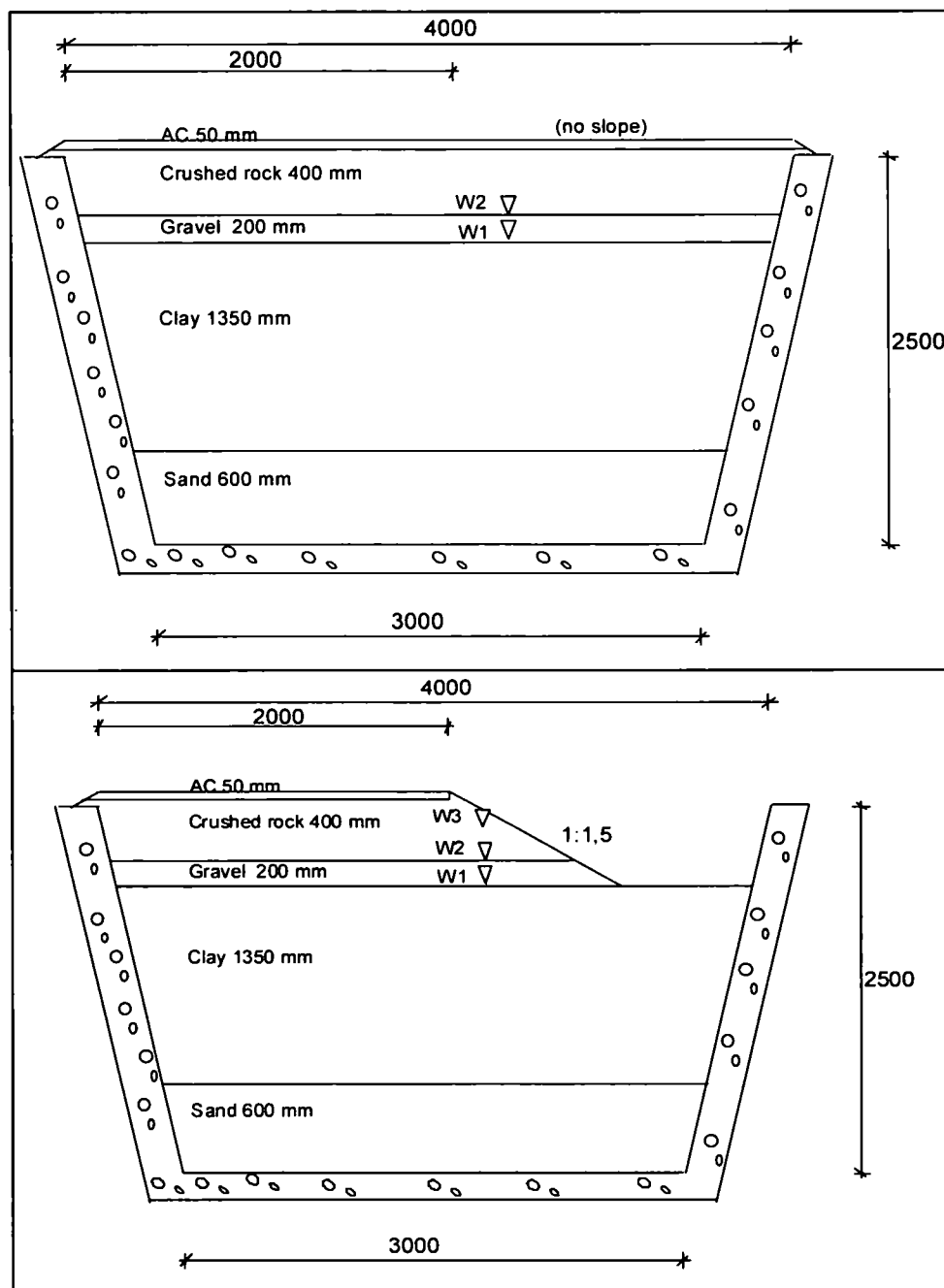
2 PERCOASEMAMITTAUKSET KEVYTPÄÄLLYSTEISTEN TEIDEN KOERAKENTEISTA OTANIEMESSÄ 2001

VTT teki HVS-koetiekoneen avulla tutkimuksia kevytpäälysteisten teiden koerakenteista Otaniemessä loppukesällä ja syksyllä 2001. Kuvassa 1 esitettiin koerakenteisiin 1 ja 3 asennettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Pohja- ja maarakenteiden laboratorion tutkimuksia varten VTT:n omaan tutkimukseen liittyvän instrumentoinnin lisäksi kaksi dielektrisyttä ja sähkönjohtavuutta mittaavaa anturia. Koerakennetta kuormitettiin seuraavilla pyöräkuormilla ja kuormituskertamäärillä:

1. 250 kpl esikuormitus 20 kN pyöräkuormalla
2. 270 kpl alkumittauksia 30, 40 ja 50 kN pyöräkuormilla
3. 5380 kpl 30 kN pyöräkuormalla
4. 5400 kpl 40 kN pyöräkuormalla
5. 3600 kpl 50 kN pyöräkuormalla
6. 1800 kpl 50 kN pyöräkuormalla vedenpinnan ollessa tasolla w2 (kuva 1)
7. 1800 kpl 50 kN pyöräkuormalla vedenpinnan ollessa tasolla w3 (luiskattu rakenne).

Kuvissa 2- 5 on esitetty koerakenteista mitatut dielektrisyysdet, sähkönjohtavuudet, kuormituskerrat ja rakenteisiin muodostuneet urasyvytydet ajan suhteen. Koerakenteen 1 kuormitusten yhteydessä rankkasateen aiheuttama veden lisääntyminen murskekerroksessa näkyi erittäin hyvin kuvan 2 dielektrisyysarvoissa. Luiskatun koerakenteen 3 sorakerroksesta mitatut dielektrisyysdet ja sähkönjohtavuudet poikkesivat käyttäytymiseltään koerakenteesta 1 mitatuista arvoista. Luiskatussa koerakenteessa 3 sorakerrokseen syntyi todennäköisesti leikkausmuodonmuutoksia kuormituksen suuruuden ollessa 40 – 50 kN. Tätä puoltaisi dielektrisyysden kohoaminen 29.lokakuuta alkumittausten aikana sekä erityisesti sähkönjohtavuuden asteittainen kasvu 40 ja 50 kN kuormitusten aikana 5.-14. marraskuuta.

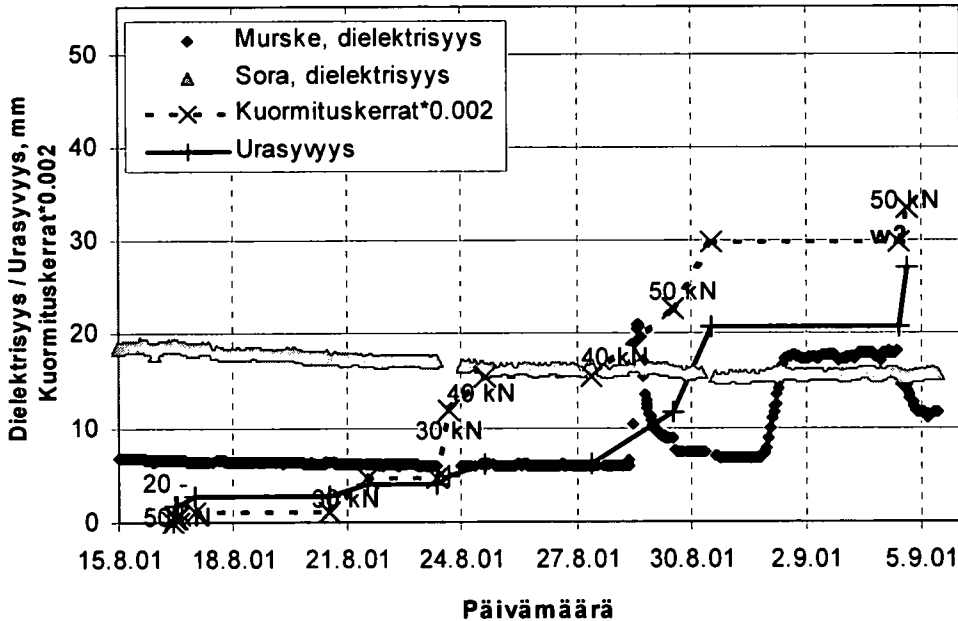
Koerakenteiden murske- ja soramateriaalille tehtiin TTY:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa vuodenaikaisvaihtelua simuloivat sykliset kolmiaksisiaalikokeet, joiden aikana näytteeseen upotetusta sondista mitattiin Percometrin avulla pääasiassa dielektrisyiden muutoksia. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty kuormitusten aikana materiaaleihin syntyneet pysyvät muodonmuutokset. Jäädytys-sulamissyklin jälkeen soramateriaalin pysyvät muodonmuutokset muodostuivat huomattavan suuriksi jo resilient-moduulimääritysten aikana ja näyte murtui nopeasti varsinaisen palautumattomia muodonmuutoksia mittaavan pitkän kuormitussarjan alussa. Kuvat 8 ja 9 esittävät soramateriaalista näytteen keskikorkeudelta mitatuissa dielektrisyyksissä tapahtuneita muutoksia pitkän kuormitussarjan aikana.



Kuva 1.

VTT:n Otaniemessä koetiekoneella kuormittamat koerakenteet 1 (ylempi) ja 3 (alempi), joihin oli asennettu dielektrisyttä ja sähkönjohtavuutta mittaavat sondit (HVS-weekly report 2001). W1, w2 ja w3 ovat pohjavedenpinnan tavoitetasoja kuormituksen eri vaiheissa. Anturit asennettiin kummassakin koerakenteessa kalliomurskekerroksen puoliväliin 0,25 metrin syvyyteen ja sorakerroksen puoliväliin 0,55 metrin syvyyteen. Anturit asennettiin päällysteen pinnalta 24 asteen kulmassa kalliomurskeeseen ja 45 asteen kulmassa soraan. Sora- ja savikerroksen välissä oli suodatinkangas.

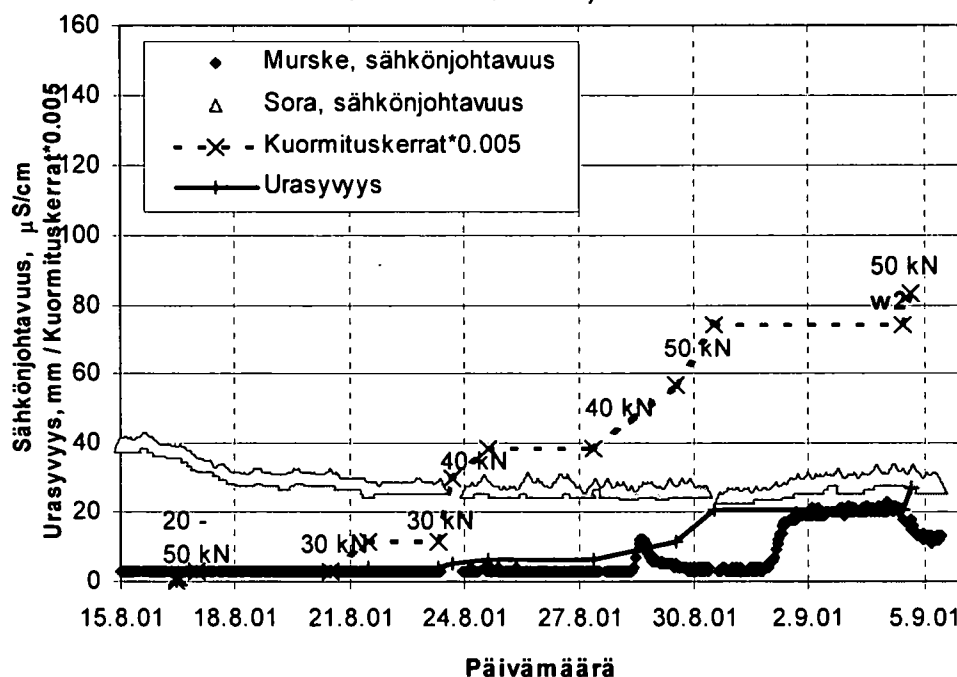
HVS -koerakenne 1, testi 16



Kuva 2.

Koerakenteen 1 dielektrisyydet ja kuormituskerrat kerrottuna 0,002:lla sekä mitatut keskimääräiset urasyvyydet ajan suhteen. Käytetty pyöräkuorma on esitetty kuormituskertojen kohdalla ja w2 tarkoittaa korotettua pohjavedenpinnantaso. Vedellä kyllästyneestä sorakerroksesta 0,55 metrin syvyydestä mitattu dielektrisyys pienentyi hitaasti alkutilanteesta, mikä johtunee sorakerroksen pienestä tiivistymisestä anturin läheisyydessä ja sitä myöten vapaan veden määrän pienentymisestä. Murskekerroksesta 0,25 metrin syvyydestä mitattu dielektrisyys nousi 28. elokuuta hetkellisesti yli arvon 20, koska rankkasateet nostivat pohjavedenpinnan tason hetkellisesti tarkoitettua korkeammalle (Korkiala-Tanttu et al. 2002). Tällöin 40 kN kuormituksen aikana muodostui myös hieman suurempia palautumattomia muodonmuutoksia kuin aiemmin 23-24. elokuuta tehtyjen 40 kN kuormitusten aikana. Murskekerroksen dielektrisyys nousi uudestaan korkealle, kun pohjavedenpinta nostettiin tasolle w2. Täten koerakenteessa 1 kuormitus ei vaikuttanut mainittavasti mitattuihin dielektrisyysarvoihin.

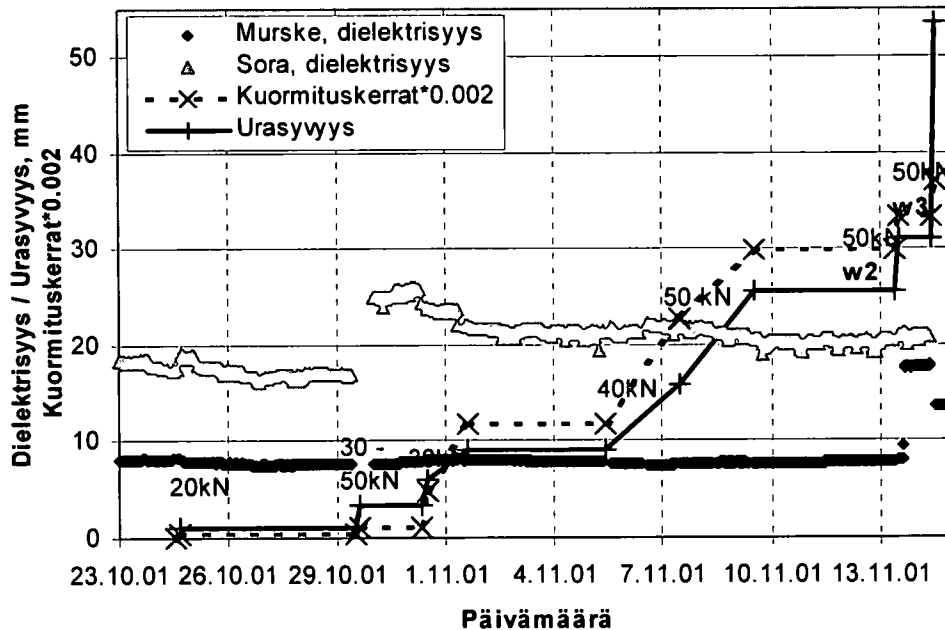
HVS -koerakenne 1, testi 16



Kuva 3.

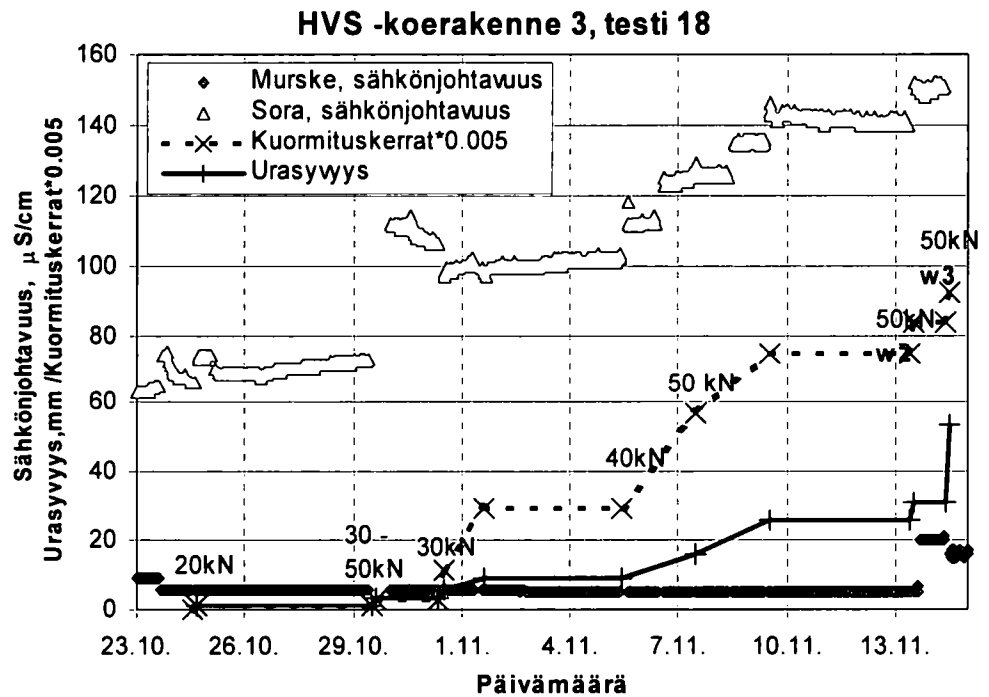
Koerakenteen 1 sähköjohtavuudet ja kuormituskerrat kerrottuna 0,005:lla sekä mitatut keskimääräiset urasyvyydet ajan suhteen. Käytetty pyöräkuorma on esitetty kuormituskertojen kohdalla ja w2 tarkoittaa korotettua pohjavedenpinnantaso. Murskekerroksen sähköjohtavuudessa 0,25 metrin syvyydessä näkyi pohjavedenpinnan tason vaihtelu saman kaltaisesti kuin dielektrisyysarvoissa. Alkumittausten aikana 16.-17.8. sorakerroksen sähköjohtavuus pieneni selkeästi jäaden tämän jälkeen 30 $\mu\text{S/cm}$ paikkeille.

HVS -koerakenne 3, testi 18



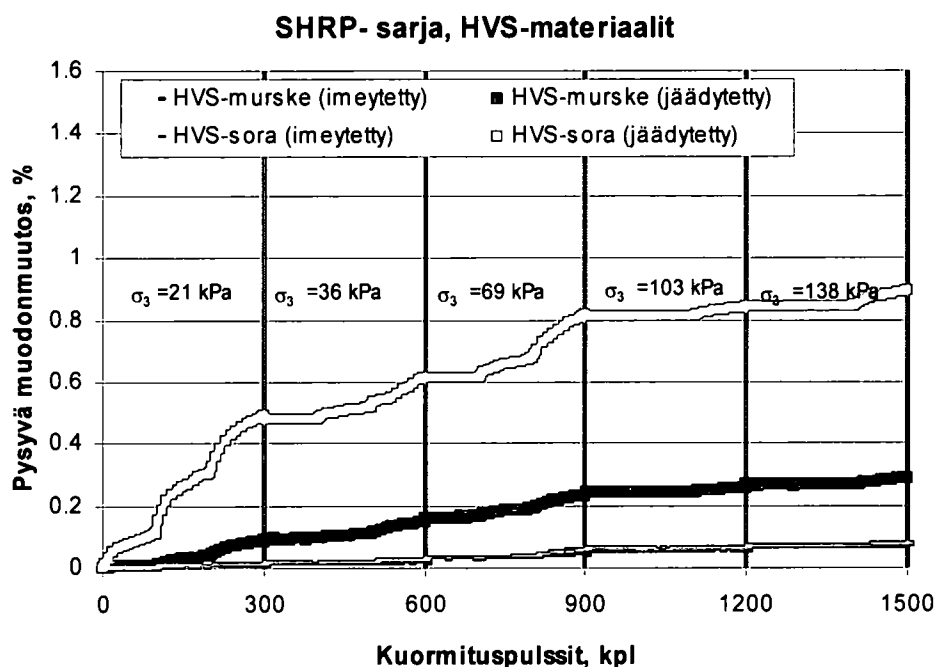
Kuva 4.

Luiskatun koerakenteen 3 dielektrisyydet ja kuormituskerrat kerrottuna 0,002:lla sekä mitatut keskimääräiset urasyvyydet ajan suhteen. Käytetty pyöräkuorma on esitetty kuormituskertojen kohdalla ja w2 sekä w3 tarkoittavat korotettuja pohjavedenpinnantasoja. Murskekerroksesta mitattu dielektrisyys käyttäytyi hyvin saman kaltaisesti kuin koerakenteesta 1 mitattu dielektrisyys. Sorakerroksessa 0,55 metrin syvyydessä dielektrisyys nousi arvoon 25, kun rakennetta kuormitettiin 30-50 kN pyöräkuormilla 29.lokakuuta. Dielektrisyyden nousun selittää raskaamman kuormituksen yhteydessä tapahtuneet kerroksen muodonmuutokset ja materiaalien löyhtyminen, jolloin veden volumetrinen osuus on suurentunut kyllästyneessä sorakerroksessa. Kun kuormitusta jatkettiin 30 kN pyöräkuormilla sorakerros tiivistyi uudelleen ja dielektrisyys pieneni arvoon 21.

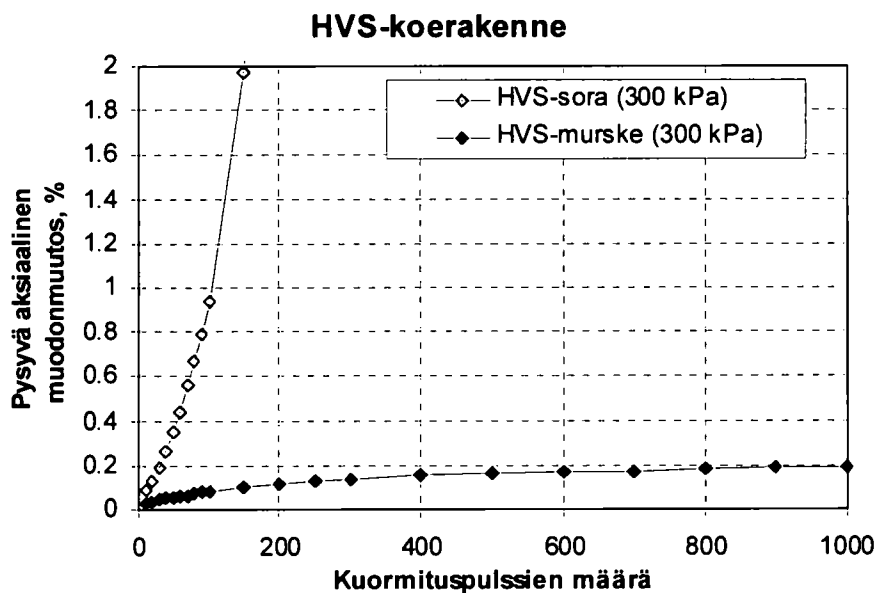


Kuva 5.

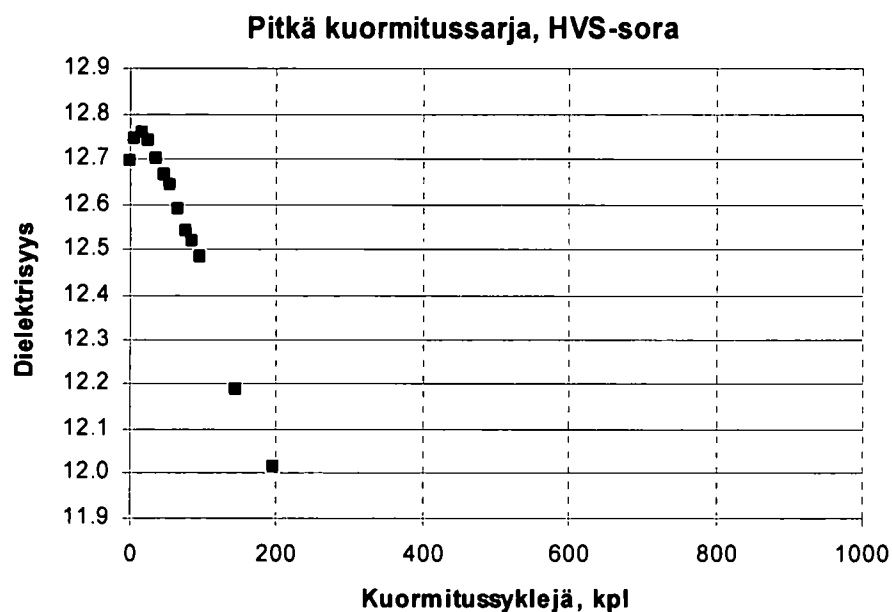
Koerakenteen 3 sähkönjohtavuudet ja kuormituskerrat kerrottuna 0,005:llä sekä mitatut keskimääräiset urasyvydet ajan suhteen. Käytetty pyöräkuorma on esitetty kuormituskertojen kohdalla ja w2 sekä w3 tarkoittavat korotettuja pohjavedenpinnantasoja. Sorakerroksessa sähkönjohtavuus oli alussa noin 70 $\mu\text{S/cm}$ nousten 29. elokuuta 30 –50 kN kuormitusten yhteydessä arvoon 110 $\mu\text{S/cm}$. Tämän jälkeen se pieneni hieman kuormitusten välipäivänä ja 30 kN kuormitusten aikana. Myöhempien 40 ja 50 kN kuormitusten yhteydessä sähkönjohtavuus nousi jälleen olleen toiseksi viimeisen kuormituksen (50 kN ja pvp-taso w2) jälkeen 150 $\mu\text{S/cm}$. Syynä sähkönjohtavuuden asteittaisen kohoamisen sorakerroksessa 40 ja 50 kN kuormitusten yhteydessä voisivat olla leikkausmuodonmuutoksista aiheutuvan maapartikkelien välisten hankausten yhteydessä huokosveteen vapautuvat kolloidit, jotka maapartikkelien pinnoilta huokosveteen siirtyessään nostavat sorakerroksesta mitattua sähkönjohtavuutta.



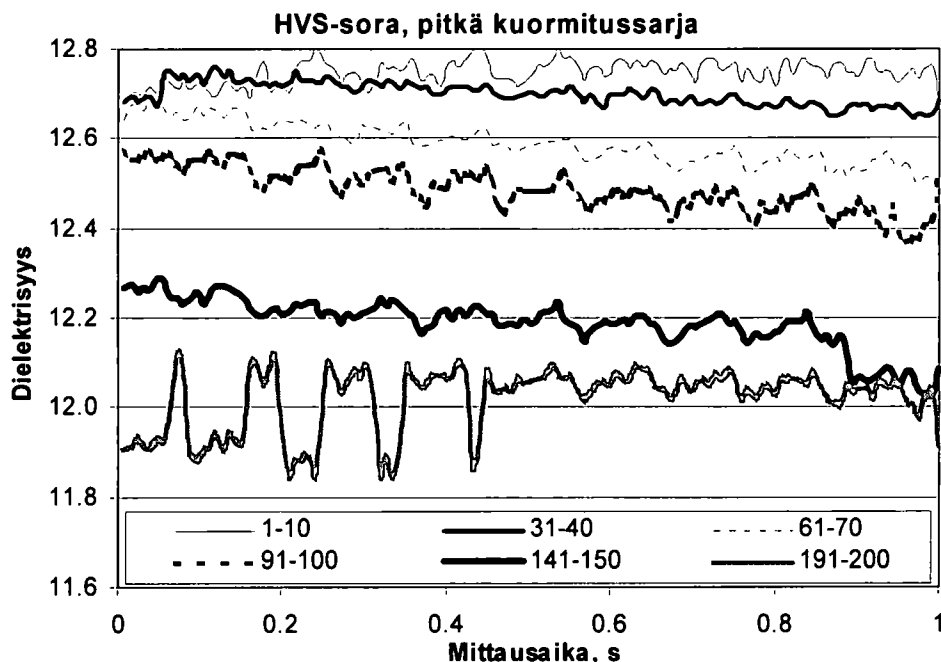
Kuva 6. Koerakenteiden soran ja kalliomurskeen resilient-moduulimääritysten yhteydessä syntyneet pysyvät muodonmuutokset vettä imeytetyillä ja jäädytys-sulamissyklin läpikäyneillä näytteillä. Soranäytteen palautumattomat muodonmuutokset muodostuivat huomattavan suuriksi jäädytys-sulamissyklin jälkeen jo suhteellisen pienillä kuormituspulssin ja sellipaineen suhteilla.



Kuva 7. Koerakenteen materiaaleista pitkässä kuormitussarjassa mitatut pysyvät muodonmuutokset jäädytys-sulamissyklin läpi käyneillä materiaaleilla. Kuormituspulssin deviatorinen jännitys oli 300 kPa ja vakiosellipaine oli 50 kPa. Murskeen pysyväksi aksiaaliseksi muodonmuutokseksi kertyi 0,4 % 100 000 kuormituspulssin jälkeen.



Kuva 8. Pitkässä kuormitussarjassa soranäytteen keskikorkeudelta mitatut keskimääräiset dielektrisyydet nousivat aluksi muutaman kymmenen kuormituspulssiin aikana kääntyen nopeasti jyrkkään dielektrisyyden pienenemiseen näytteen murtuessa. Kokeen alussa kuormituspulssin todellinen arvo kasvoi hitaasti ollen tavoitesuuruudessa 300 kPa neljäkymmenen kuormituspulssin jälkeen. Tällöin näyte pienen tiivistymisen jälkeen murtui 300 kPa:n kuormituksella ja näyte löyhtyi (dilataatio), jolloin ilman suhteellinen osuus tilavuudesta suureni veden osuuden pienentyessä.



Kuva 9.

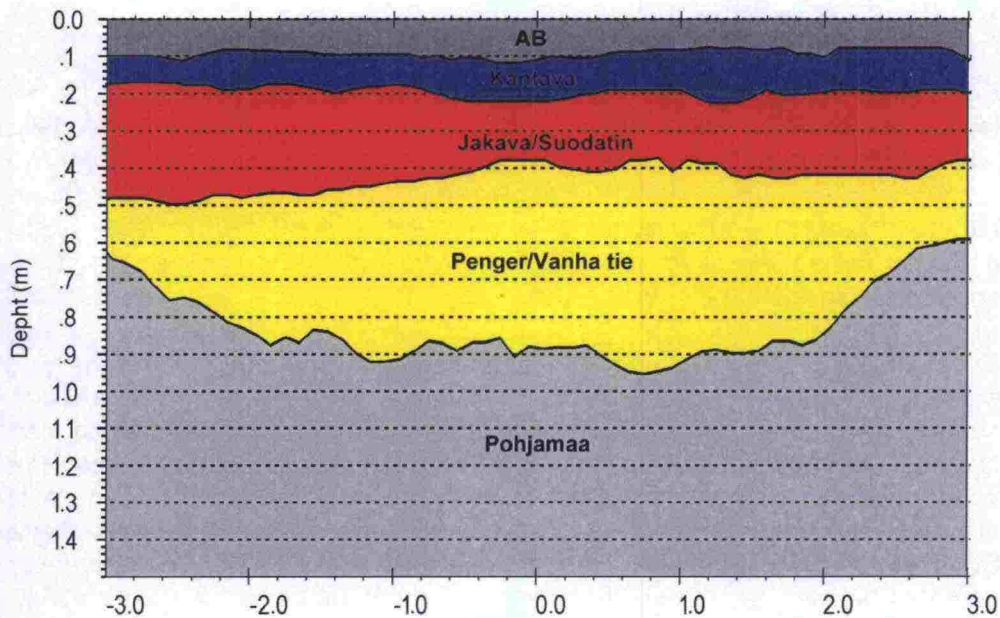
Pitkän kuormitussarjan eri vaiheissa sorasta mitattuja dielektrisyysarvoja. Kuormituspulssien numerot on esitetty selitteessä. Dielektrisyys on mitattu sekunnin kestävien kymmenen kuormituspulssin pituisten jaksojen ajalta pitkän kuormitussarjan eri vaiheissa. Dielektrisyys pieneni toistokuormituksen aikana yksittäisien kuormituspulssien jopa erottuessa mitatuissa dielektrisyysarvoissa. Viimeisen mitatun kuormituspulssisarjan aikainen suurempi dielektrisyysvaihtelu voisi johtua näytteen löyhtymisen loppumisesta, jolloin näytteessä veden tilavuussuhteet eivät enää juurikaan muutu. Tällöin vesimolekyylit hakeutuvat tasapainotilaan partikkelien pinnoilla osan kiinnittyessä välillä adsorptioveteen ja ollen välillä osana vapaata vettä.

3 PERCOASEMAMITTAUKSET SÄIJÄSSÄ

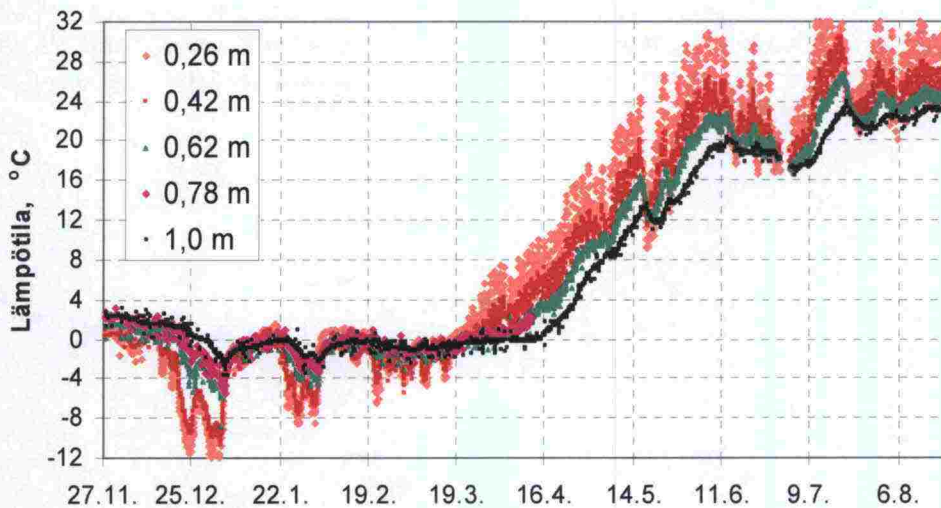
Percoasema asennettiin vähäliikenteiselle päällystetylle tielle Tampereen lounaispuolelle marraskuun lopulla 2001. Percoaseman kohdalla matalapenkereinen tie oli peltoaukealla. Kuvassa 10 on esitetty maatutkalla määritetty tien poikkileikkaus Percoaseman antureiden asennuskohdan läheltä. Kuvassa 11 on esitetty tierakenteesta mitatut lämpötilat, joista havaittiin lämpötilan olleen 1,0 metrin syvyydessä pienemmillään $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suurimmillaan $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kuvassa 12 on esitetty Percoasemalla mitatut dielektrisyys-, sähkönjohtavuus- ja lämpötila-arvot keväällä 2002 tierakenteen roudan sulaessa. Sorarekalla tehtyjen kuormitusten aikana vähäliikenteisen tien sulaneet kerrokset tiivistyivät ja veden volumetrinen osuus kerroksissa väheni raskaan kuormituksen ajaessa vettä pois rakenteesta. Tätä ilmiötä ei oltu havaittu aiemmin tehdyissä mittauksissa raskaasti kuormitetulla tiellä Rovaniemen Koskenkylän Percoasemalla. Kuvat 13 ja 14 kuvaavat tienrakenteessa tapahtuneita roudan sulamispainumia keväällä 2002 Percoaseman kohdalla. Kuvan 14 perusteella routanousua todetaan tapahtuneen pääosin pohjamaassa sekä myös vanhassa tierakenteessa.

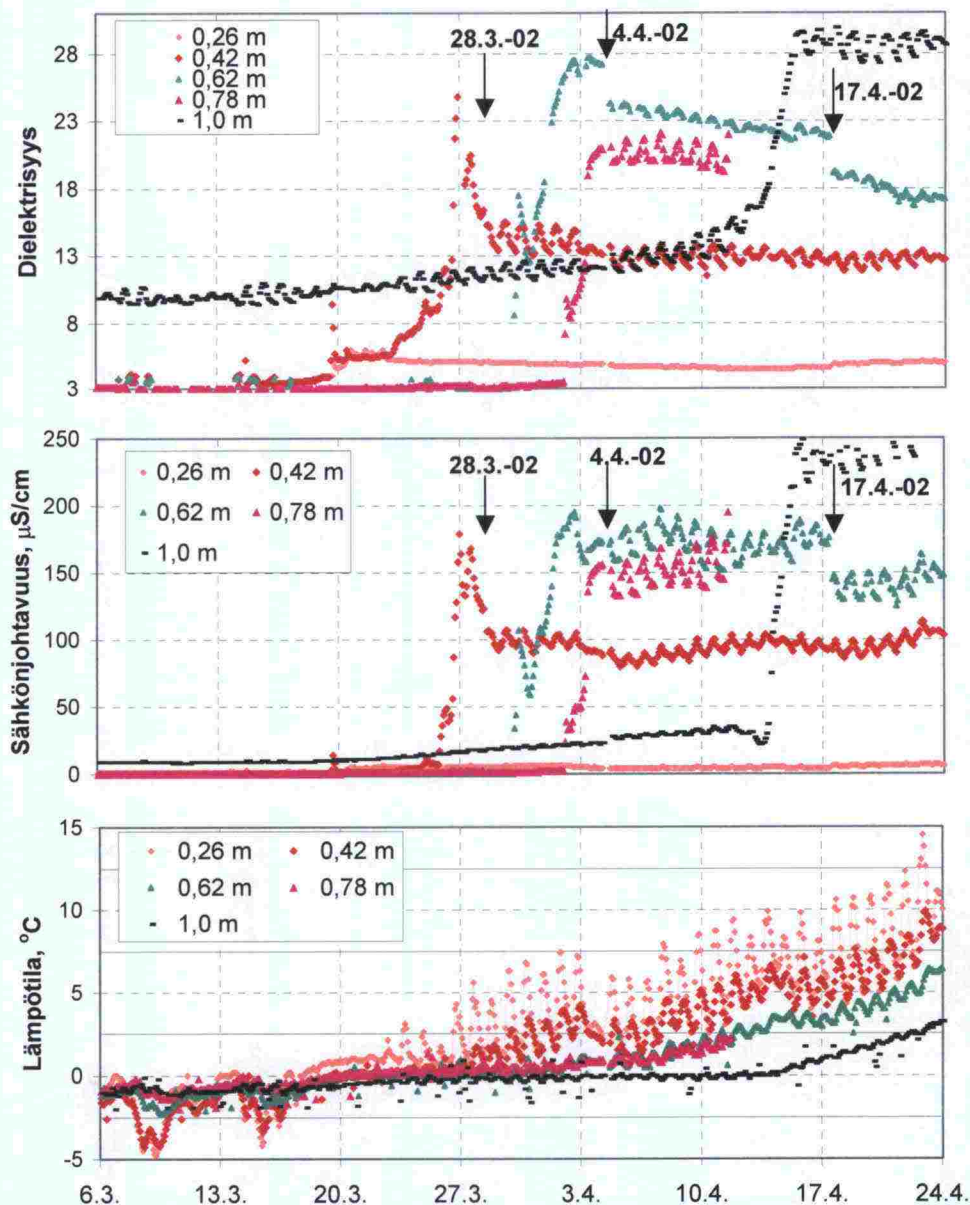
Kuvassa 15 on esitetty dielektrisyiden muutokset ensimmäisessä mittauksessa sorarekan ylittäessä anturit. Dielektrisyiden pieneneminen 0,42 metrin syvyydessä johtui rakenteen tiivistymisestä anturin ympäristössä sekä sorarekan aikaansaamasta veden virtauksesta, joka poisti vettä anturin ympäristöstä. Tiivistyminen on pääosin johtunut marraskuussa 2001 jäätyneeseen tiekerrokseen asennetun anturin jäämisestä löyhään kontaktiin maapartikkelien kanssa. Tämän jälkeisissä mittauksissa ei havaittu selkeitä muutoksia dielektrisydessä sorarekan ylittäessä mittauskohdan. Päivän kuluessa dielektrisyys pieneni 0,42 metrin syvyydessä arvosta 17 arvoon 15.



Kuva 10. Maatutkalla määritetyt tien poikkileikkauksen kerrosrajat Säijän Percoaseman antureiden lähellä. Vanhan tierakenteen ja jakavan kerroksen välissä oli suodatin kangas. Anturit asennettiin kahden metrin etäisyydelle tien keskilinjasta 0,26, 0,42, 0,68, 0,78 ja 1,0 metrin syvyyteen tienpinnasta.

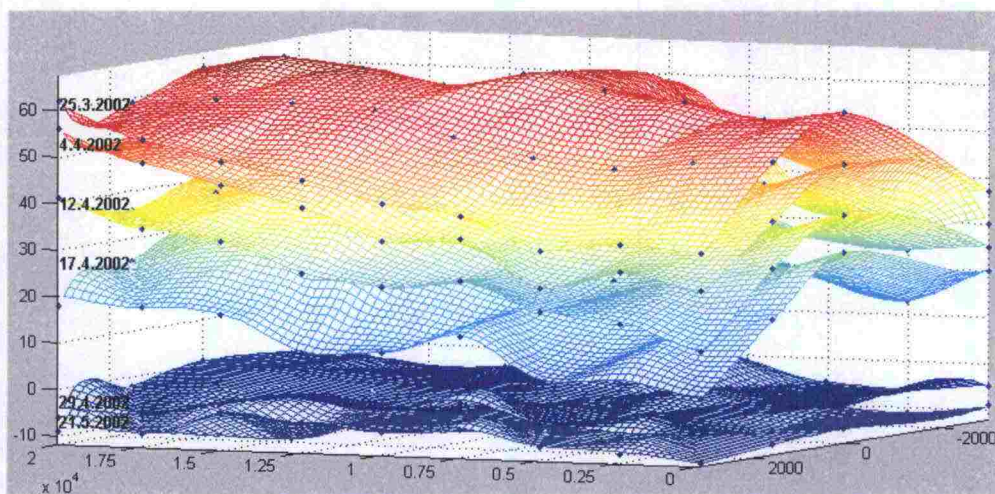


Kuva 11. Percoasemalla tierakenteesta mitatut lämpötilat Säijässä. Tierakenteen alla pohjamaassa 1,0 metrin syvyydessä lämpötila oli pienimmillään -4 °C ja suurimmillaan +24 °C.



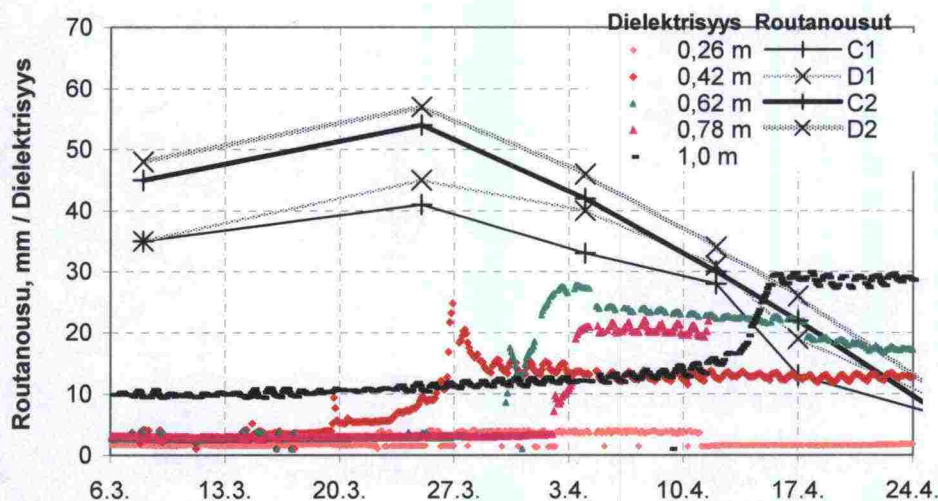
Kuva 12.

Säijän Percoaseman mittaustulokset tierakenteen roudan sulamisajalta keväällä 2002. Nuolilla on merkitty ajankohdat, jolloin 60 tn sorarekalla ajettiin mittausten yhteydessä edestakaisin mittaushohteen yli. Dielektrisyys pieneni 0,42 ja 0,62 metrin syvyyksissä harppauksen omaisesti, kun tierakennetta kuormitettiin 60 tonnin perävaunullisella sorarekalla, jolloin kerrokset antureiden kohdalla tiivistyivät routanousujen jäljiltä. 0,78 metrin syvyydessä anturin ympäristö oli juuri sulamassa kuormitusten aikana, jolloin siitä ei tapahtunut samankaltaista dielektrisyiden pienenemistä. 0,78 metrin anturi rikkoutui 11.4.2002. Pohjamaassa ei viimeisen kuormituksen yhteydessä tapahtunut dielektrisyiden pienenemistä. Sähkönjohtavuudessa tapahtui vastaavat arvojen pienenemiset kuormitusten aikana. Tiessä lämpötilojen vuorokausivaihtelu oli aurinkoisina päivinä 0,26 metrin syvyydessä noin 5 °C ja lämpötilavaihtelu erottui hyvin jopa 0,62 metrin syvyydessä.



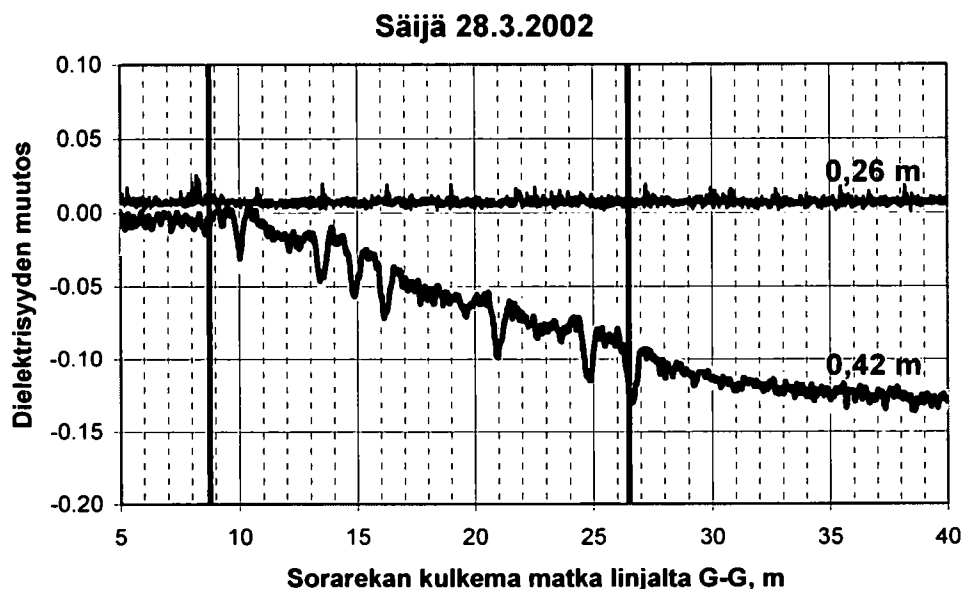
Kuva 13.

Säijän Percoasemalla keväällä 2002 mitatut sulamispainumat. Mitat on esitetty millimetreinä ja korkeusmuutosten nolla-arvoina on käytetty ensimmäisiä routamittauksia 20.11.2001. Mittaukset on tehty 20 metrin pituudelta. 70-60 mm routanousuista huolimatta tiehen ei ole syntynyt keskilinjän pituushalkeamaa lukuun ottamatta muita vaurioita sulamispainuman tapahtuessa suhteellisen tasaisesti.



Kuva 14.

Säijässä keväällä 2002 mitatut dielektrisyys eri syvyyksiltä ja neljästä pisteestä mitatut tien routanousut verrattuna 20.11.2001 mitattuun tasoon. Dielektrisyys on mitattu näiden pisteiden välistä. Routanousumittausten ja dielektrisyysarvojen nousun perusteella routanousut ovat syntyneet pääosin pohjamaahan sekä vanhaan tierakenteeseen, joissa dielektrisyysarvot pysyivät korkeina.



Kuva 15. Säijän Percoasemalla mitatut dielektrisyyden muutokset syvyyksiltä 0,26 ja 0,42 m seitsemän akselisen sorarekan ajaessa mittauskohdan ylitse 28.3.2002 nopeudella 5 km/h. Mittaus aloitettiin sorarekan ylittäessä linjan G 8,7 metrin etäisyydellä mittausantureista. Dielektrisyyden pieneneminen 0,42 metrin syvyydessä johtui rakenteen tiivistymisestä anturin ympäristössä sekä sorarekan aikaansaamasta veden virtauksesta, joka poisti vettä anturin ympäristöstä. Tiivistyminen on pääosin johtunut marraskuussa 2001 jäätyneeseen tiekerrokseen asennetun anturin jäämisestä löyhään kontaktiin maapartikkelien kanssa. 0,26 metrin syvyyteen asennettu anturi on hyvin karkeassa kerroksessa. Mittausten alkaessa dielektrisyysarvot olivat 0,26 metrin syvyydessä 5 ja 0,42 metrin syvyydessä 17.

4 LILLBYN JA EMETIN KALLIOMURSKEIDEN KOESARJA

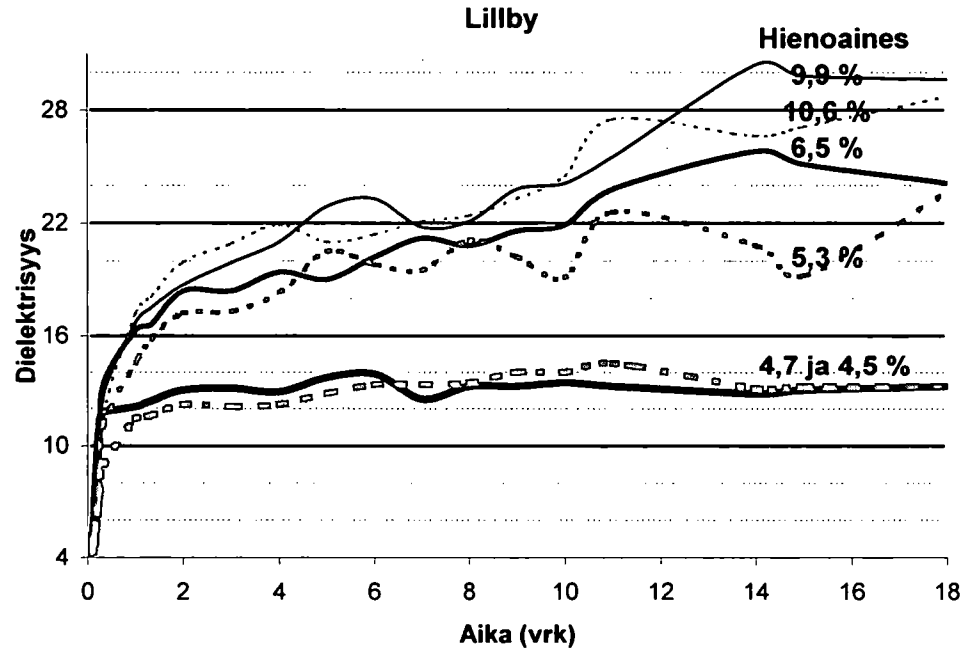
Happamalla Lillbyn ja emäksisellä Emetin kalliomurskeilla haluttiin tutkia kahden erityyppisen kalliomurskeen hienoaineksen sekä muutamien käsittelyaineiden vaikutusta pääasiassa Tube suction -kokeiden dielektrisyysarvoihin. Lillbyn kalliomurske on luokiteltu käytettäväksi vähäliikenteisien teiden kantavassa kerroksessa ja päällysteessä, joissa se on toiminut toistaiseksi suunnitellusti. Kohtuullisen hyvälaatuisen Emetin kalliomurskeen rakeisuuskäyrä on roikkuva. Emetin kalliomurskeen tiivistämisessä on kuitenkin varottava murskeen hienontumista sekä sen laatua paikoitellen heikentävien kiisujen ja grafiitin määrää, jotka vähentävät sen laajempaa käyttöä. Kumpaakin mursketta haluttaisiin käyttää laajemmalti.

Tube Suction -kokeen perusteella sitomattomat murskeet voidaan luokitella sopimattomaksi kantavaan kerrokseen sen dielektrisyysarvon ollessa suurempi kuin 16 sekä kyseenalaiseksi dielektrisyysarvon ollessa 10-16. Tosin Suomessa hyvälaatuisen kantavan kerroksen kalliomurskeen rajana suositellaan dielektrisyysarvoa 9 (Saarenketo 2000). Lillbyn kalliomurskeella kokeiltiin lisäksi tehokkaimman käsittelyaineen vaikutusta vuodenaikaisvaihtelua simuloivassa syklisessä kolmiakσιαalikoesarjassa.

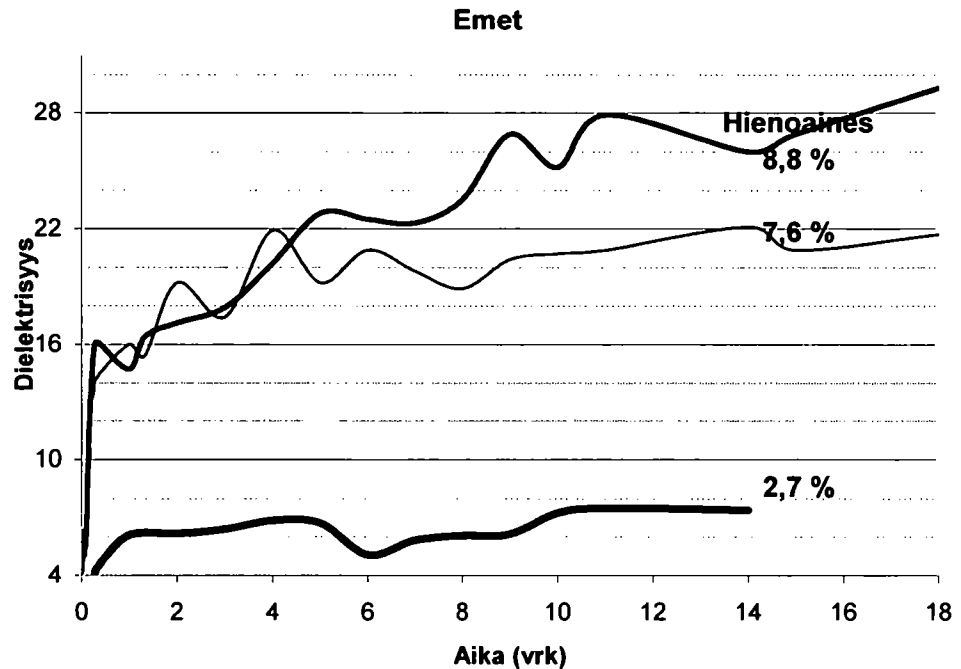
Kuvissa 16 ja 17 on esitetty Tube Suction -kokeen dielektrisyyskuvaajilla hienoainesmäärän vaikutusta Lillbyn ja Emetin (0-20 mm) kalliomurskeissa. Kalliomurskeet soveltuisivat mittausten perusteella kantavaan kerrokseen ainoastaan hienoainespitoisuuden ollessa riittävän pieni. Kuvissa 18 ja 19 on esitetty neljän käsittelyaineen vaikutusta Lillbyn ja Emetin kalliomurskeisiin. Kokeiden perusteella 1,5 % lisäys käsittelyaine D:tä paransi näiden kahden kalliomurskeen vedenherkkyysongelman. Emetin kalliomurskeella kaksi prosenttia käsittelyainetta B oli myös riittävä määrä parantamaan vedenherkkyysominaisuudet. Muilla käsittelyaineilla käytetyt määrät eivät olleet alentaneet riittävästi Tube Suction -kokeissa mitattavaa dielektrisyyttä.

Vuodenaikaisvaihtelua simuloivat sykliset kolmiakσιαalikokeet tehtiin Lillbyn kalliomurskeen rakeisuuksilla 0-20 mm ja 0-32 mm sekä 0-20 mm, johon oli lisätty käsittelyainetta D. Kuvat 20 ja 21 osoittavat selkeästi käsittelyaineen D toimineen tehokkaasti estäen jäädytysyökin aikana veden lisääntymisen näytteessä ja sitä kautta pysyvien aksiaalisten muodonmuutosten syntyminen jäädytys-sulamissyklin jälkeisissä kuormituksissa.

Kokeiden perusteella käsittelyaineet kuten myös murskeen tiivistystapa saattavat vaikuttaa huomattavasti kalliomurskeen tiivistyvyyteen. Tube Suction -näytteet tiivistettiin ICT -kiertotiivistimellä, jolloin käsittelyaineella D käsiteltyjen näytteiden kuivatilavuuspainot jäivät noin 3 kN/m³ alhaisemmiksi. Kolmiakσιαalikokeiden näytteet tiivistettiin kerroksittain tärytiivistyksellä, jolloin käsittelyaineella D käsitellyn Lillbyn kalliomursken näytteen kuivatilavuuspaino oli enää 0,5 kN/m³ pienempi kuin vastaavalla tavalla tiivistetyn käsittelemättömän Lillbyn kalliomurskeen tilavuuspaino.

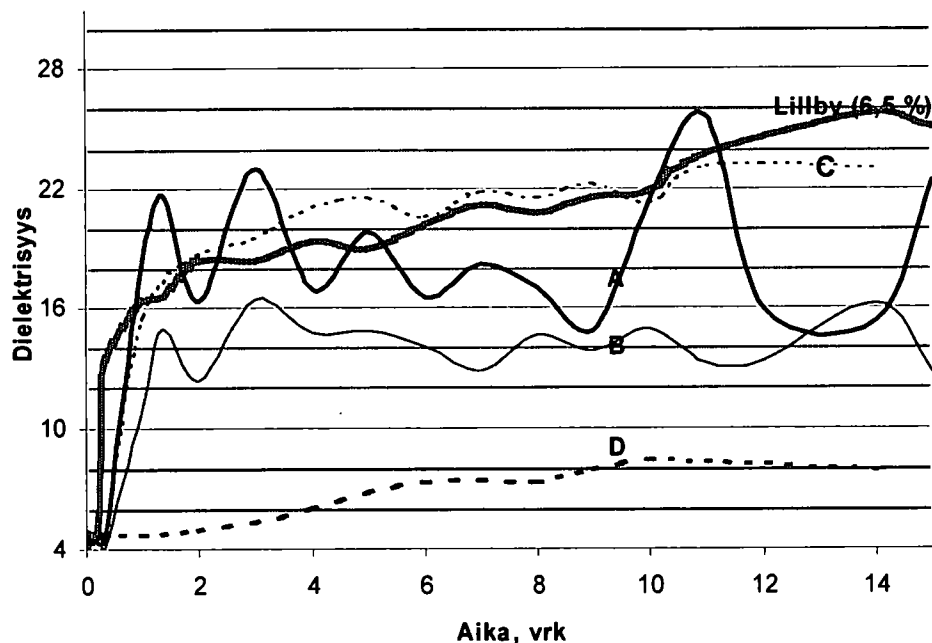


Kuva 16. Lillbyn kalliomurskeen Tube Suction -kokeiden dielektrisyyskuvaajat. Hienoainespitoisuus (<0,063 mm) määritettiin näytteiden yläosasta. Korkeat dielektrisyysarvot sekä niiden nopea nousu osoittavat Lillbyn kalliomurskeen olevan altis veden imeytymiselle.



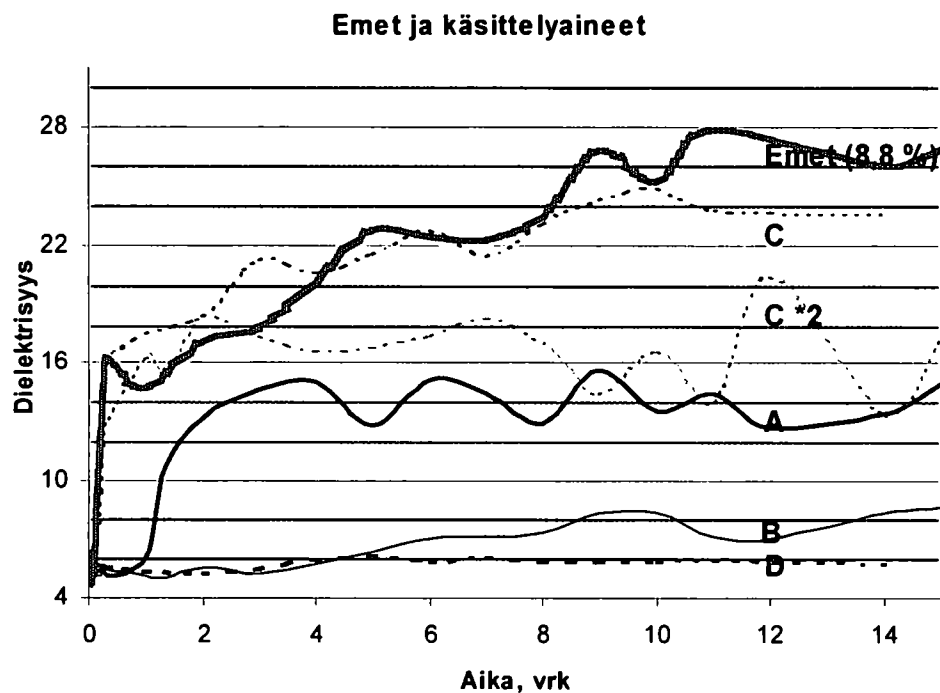
Kuva 17. Emetin kalliomurskeen Tube Suction -kokeiden dielektrisyyskuvaajat. Hienoainespitoisuus (<0,063 mm) määritettiin näytteiden yläosasta. Riittävän alhaisella hienoainespitoisuudella Emetin kalliomurske soveltuu vielä käytettäväksi kantavassa kerroksessa.

Lillby ja käsittelyaineet

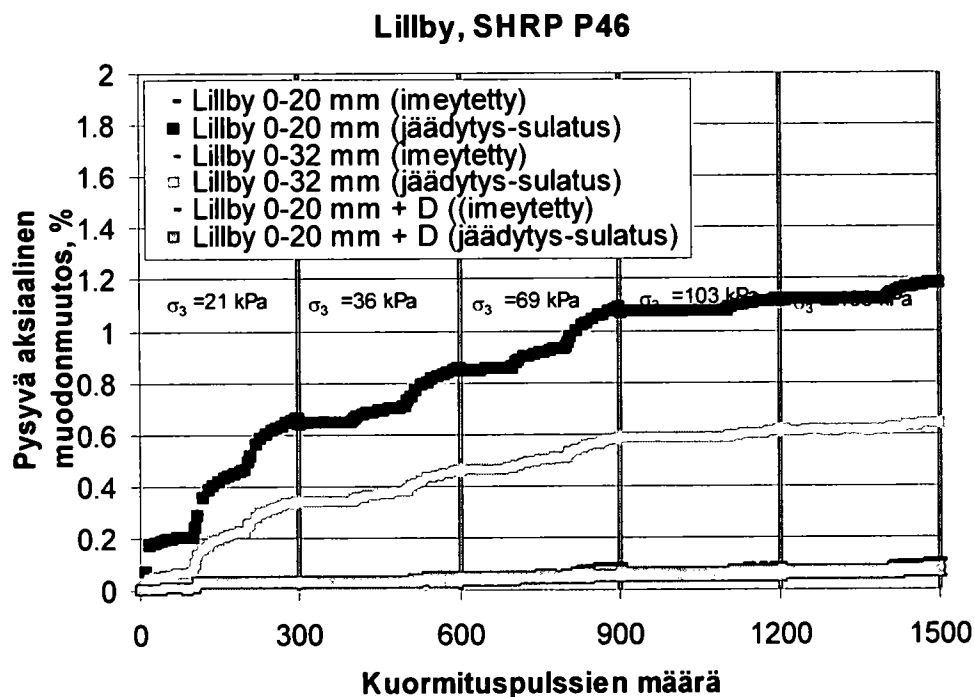


Kuva 18.

Lillbyn kalliomurskeen Tube Suction -kokeen dielektrisyyskuvaajan vertailu erilaisilla käsittelyaineilla käsiteltyihin näytteisiin. Ainoastaan käsittelyaine D pienensi riittävän tehokkaasti Lillbyn kalliomurskeen vedenherkkyttä. Muista Tube Suction -koenäytteistä poiketen käsittelyaineella D käsitellyn näytteen kuivatilavuuspaino, $19,3 \text{ kN/m}^3$, jäi selkeästi alhaisemmaksi muiden näytteiden yli 22 kN/m^3 :iin verrattuna.

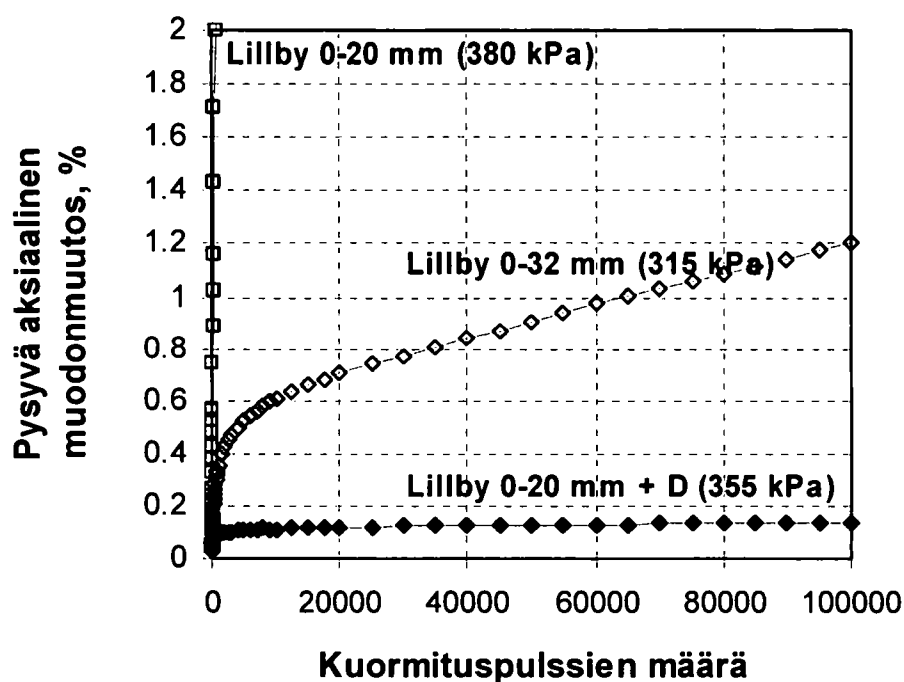


Kuva 19. Emetin kalliomurskeen Tube Suction -kokeen dielektrisyyskuvaajan vertailu erilaisilla käsittelyaineilla käsiteltyihin näytteisiin. Käsittelyaineet B ja D paransivat riittävästi Emetin kalliomurskeen ominaisuuksia Tube Suction -kokeen perusteella. Myös Emetin kalliomurskeella käsittelyainetta D sisältäneen näytteen kuivatilavuuspaino, $19,9 \text{ kN/m}^3$, jäi selkeästi alhaisemmaksi muiden näytteiden yli 22 kN/m^3 :iin verrattuna. Suositusmäärään nähden kaksinkertainen määrä käsittelyainetta C (kuvaaja C*2) ei vielä vähentänyt riittävästi Emetin vedenherkkyysominaisuutta.



Kuva 20.

SHRP P46:n (AASHTO 1992) mukaisten resilient - moduulimääritysten yhteydessä näytteistä mitatut palautumattomat muodonmuutokset imeytyksen ja jäädytys-sulamissyklin jälkeen. Ennen jäädytys sykliä näytteisiin ei ollut syntynyt juurikaan pysyviä muodonmuutoksia. Käsittelyaine D esti jäädytyksen aikana vesipitoisuuden kasvun, jolloin näytteen sulamisen jälkeen tehdyssä kuormituksessa siinä ei havaittu myöskään pysyviä muodonmuutoksia. Rakeisuudeltaan karkeammassa Lillbyn näytteessä pysyvät muodonmuutokset olivat odotetusti pienemmät kuin 0-20 mm rakeisuudella. Silti Lillbyn 0-32 mm näytteen pysyvät muodonmuutokset olivat liian suuria kokeessa käytäviin kuormituspulssien ja sellipaineiden suhteisiin nähden. Näytteiden kuivatilavuuspainot olivat käsittelemättömällä murskeella noin 21,5 kN/m³ ja käsittelyaineella D käsitellyllä murskeella 20,9 kN/m³.



Kuva 21.

Jäädytys-sulamissyklin jälkeisten resilient –moduulimääritysten jälkeen tehdyistä pitkistä kuormitussarjoista mitatut palautumattomat muodonmuutokset. Kuormitussarjoissa sellipaine oli 50 kPa ja kuormituspulssin keskimääräinen deviatorinen jännitys on esitetty suluissa näytteen nimen jälkeen. Käsittelyaineella D käsitelty Lillbyn 0-20 mm kalliomurske kesti erinomaisesti pitkässä kuormitussarjassa. Käsittelemätön Lillbyn 0-20 mm näyte murtui lopullisesti heti kuormituksen alkaessa. Karkeampi Lillbyn 0-32 mm kalliomurske ei murtunut kuormituksessa, mutta 100 000 kuormituspulssin aikana näytteeseen muodostui huomattavat pysyvät aksiaaliset muodonmuutokset.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kevytpäällysteisten teiden tutkimusohjelman koetiekonekuormitusten yhteydessä luiskatun koerakenteen 3 sorakerroksesta mitattujen dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvojen pitkäaikainen käyttäytyminen poikkesi selkeästi luiskaamattoman koerakenteen 1 mittaustuloksista. Koerakenteen 3 jakavan kerroksesta sorasta mitatut arvot voisivat indikoida sitä, että 40 – 50 kN pyöräkuormilla tehdyistä kuormituksista aiheutui leikkausmuodonmuutoksia sorakerrokseen. Tätä on tukenut erityisesti sähkönjohtavuuden kasvaminen aina 40 - 50 kN pyöräkuormilla tehtyjen kuormitusten aikana, jolloin sorakerroksessa syntyneet leikkausmuodonmuutokset lienevät aiheuttaneet maapartikkelien välisen hankauksen vaikutuksesta maapartikkelien pinnoilta irtautuvien kolloidien määrän lisääntymistä huokosvedessä.

Vuodenaikaisvaihtelua simuloivassa syklisessä kolmiaksaalikokeessa kevytpäällystetutkimuksen koerakenteiden soraan muodostui suhteellisen suuret pysyvät muodonmuutokset jo jäädytys-sulamissyklin jälkeisen resilient-moduulimäärityksen aikana soran kyllästysasteen ollessa korkea. Pitkässä kuormituspulssisarjassa soranäytteen dielektrisyys kasvoi ensin muutaman kymmenen kuormituspulssin ajan, jonka jälkeen dielektrisyys pieneni nopeasti näytteen murtuessa. Kyseinen dielektrisyyden nousu ja nopea pieneneminen lienee johtunut pääasiassa näytteen murtumisen yhteydessä aluksi tapahtuvasta vähäisestä tiivistymisestä ja sen jälkeisestä dilataatiosta, mikä vahvistaa aiempia havaintoja dielektrisyyden käyttäytymisestä näytteen murtuessa. Ensimmäistä kertaa laboratoriokokeessa pitkän kuormituspulssisarjan mittauksissa kuitenkin erottuivat yksittäiset kuormituspulssit myös mitatuissa dielektrisyysarvoissa.

Säijässä Percoaseman kohdalla tierakenne vaikutti toimivan riittävän hyvin suhteessa tiellä kulkevaan liikennemäärään ja -jakautumaan. Mittausten perusteella tierakenteen mahdolliset ongelmat näyttäisivät johtuvan pohjamaan ja vanhan tierakenteen alaosan routanousuista. Säijän Percoasemalla tehdyissä mittauksissa tierakenteen tiivistymisen vaikutus roudan sulamispainuman aikana antureiden ympäristössä näkyi dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvojen selkeänä pienenemisenä sorarekan kuormittaessa tierakennetta, mitä ei oltu aiemmin Koskenkylän Percoasemalla tehdyissä mittauksissa havaittu.

Säijässä tierakenteesta mitatuista lämpötiloista huomattiin vuorokautisen lämpötilavaihtelun olevan aurinkoisina päivinä huomattavan suurta vaihtelun ollessa 0,42 metrin syvyydellä vielä 2-3 °C. Huomattavaa oli myös, että lämpimänä kesänä yhden metrin syvyydessä peltoaukealla sijaitsevan tien alla pohjamaan lämpötila nousi korkeaksi ollen jopa 20 - 24 °C yli kuukauden ajan.

Lillbyn ja Emetin kalliomurskeiden laboratoriotutkimus osoitti selvästi käsittelyaineissa olevan potentiaalin parantaa heikkolaatuisten murskeiden ominaisuuksia. Samalla paljastui kuitenkin se, etteivät kaikki käsittelyaineet täytä odotuksia tai että ne soveltuvat mahdollisesti vain tietyille materiaaleille.

Vuodenaikaisvaihtelua simuloivan syklisen kolmiaksaalikoesarjan perusteella karkeampi rakeisuus ei poistanut ongelmallisen Lillbyn

kalliomurskeen routanousua ja huomattavien palautumattomien muodonmuutoksien syntymistä vaikkakin selkeästi pienensi niitä. Käsittelyaineen D lisääminen Lillbyn hienorakeisempaan kalliomurskeeseen sen sijaan esti routanousun ja palautumattomien muodonmuutosten syntymisen näytteeseen. Koesarjan tulos tuki osaltaan aikaisemmin saatuja kantavan kerroksen murskeelle asetettuja dielektrisyiden raja-arvoja

6 VIITTEET

AASHTO T 294-92 I. 1992. Interim method of test for resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils – SHRP protocol P46. American Association of State Highway and Transportation Officials.

HVS-weekly report. 2001. Excel-sheets send by Pekka Halonen.

Korkiala-Tanttu, L., Jauhiainen, P., Halonen, P., Laaksonen, R., Juvankoski, M., Kangas, H., ja Sikiö, J. 2002. Luiskatun tierakenteen urautuminen. Helsinki 2002. Tiehallinnon selvityksiä 33/2002. 65 s. + liitt. (luonnos)

Saarenketo 2000. Tube Suction Test – Sitomattomilla murskeilla suoritettujen rengastestien tulokset. Tielaitos, Lapin tiepiiri. Tielaitoksen selvityksiä 20/2000. 33 s + liitt.

Saarenketo, Timo 2001. Percoaseman tutkimukset 1999-2001 Mt 9241 Koskekylä, Rovaniemen maalaiskunta. Tutkimusraportti. Roadscanners, 57s + 4 liites.

Saarenketo, Timo and Scullion, Tom 1995. Using Electrical Properties to Classify the Strength properties of Base Course Aggregates. Research Report 1341-2. Texas Transport Institute, College station, Texas.

Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Yliheikkilä, T. ja Ylitapio, S. 2000. Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet: osat I ja II. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laboratorio, Julkaisu 51. 71 s. + 37 liites. ja 42 s. +20 liites.

Saarenketo, Kolisoja, Vuorimies ja Ylitapio, 2001. Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet. Tiehallinto, Helsinki. Tiehallinnon selvityksiä 9/2001. 20 s.

Vuorimies, N., Kolisoja, P. ja Saarenketo, T. 2002. Rovaniemen Koskenkylän Percoaseman tutkimukset 2001. Tiehallinto, Lapintiepiiri. Tiehallinnon selvityksiä 9/2002.

KÄSITTEITÄ

Dielektrisyys

Dielektrisyysarvo on materiaalin kompleksisen dielektrisen permittiviteetin suhde tyhjiön dielektriseen permittiviteettiin. Dielektrisyysarvon reaaliosa voi vaihdella ilman arvosta yksi vapaan polaarisen veden arvoon 81. Käytännön mittauksissa dielektrisyys kuvaa materiaalin huokostilassa olevan vapaan veden volymetristä määrää.

Sähkönjohtavuus

Materiaalien sähkönjohtavuus on elektronien ja ionien vapaata liikettä tai rajoitettua siirtymistä. Sähkönjohtavuus maamateriaalissa mittaa lähinnä huokosvedessä olevien liuenneiden suolojen tai hiukkasten eli kolloidien määrä, jotka pääosin siirtävät sähköistä varausta kiinteän maan omatessa useimmiten huonon sähkönjohtavuuden.

Tube Suction –koe (TS-koe)

Tube Suction –kokeella testataan laboratoriossa materiaalin vedenherkkyyssominaisuutta. Varsinaisessa mittauksessa putkessa oleva 180-200 mm korkea kuiva näyte asetetaan pohjaltaan 10 mm tislattuun tai deionisoituun veteen. Näytteen yläpinnasta mitataan pinta-anturilla dielektrisyyttä ja sähkönjohtavuutta tietyin aikavälein. Testin loppuvaiheessa mitattujen dielektrisyysarvojen perusteella voidaan kantavan kerroksen sitomattomat murskeet luokitella hyvälaatuisiksi dielektrisyiden ollessa alle 10, kyseenalaiseksi dielektrisyiden ollessa 10-16 ja sekä sopimattomaksi dielektrisyiden ollessa yli 16. Suomessa myös dielektrisyysarvoa 9 on käytetty raja-arvona hyvälaatuiselle sitomattomalle kantavan kerroksen murskeelle (Saarenketo 2000).

Percoasema

Percoasema on reaaliaikainen tierakenteiden kosteus- ja kantavuustilaa seuraava mittausjärjestelmä. Percoasemalla mitataan halutuilla aikaväleillä tien rakennekerrokseen asennetuista antureista dielektrisyyttä, sähkönjohtavuutta ja lämpötilaa. Percoaseman mittausten avulla voidaan muun muassa optimoida painorajoitusten asettamisen poistamisen ajankohtia.

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-191-6
TIEH 3200852